

Studio della correlazione tra il tremore vulcanico e l'attività esplosiva dell'Etna nel gennaio-febbraio 1999 mediante il sistema VoTA (Volcanic Tremor Analyzer)

E. Pecora, M. Coltelli

Riassunto

Il seguente lavoro presenta lo studio della correlazione tra il tremore vulcanico e l'attività esplosiva dell'Etna nel gennaio-febbraio 1999 effettuato mediante l'implementazione e lo sviluppo del sistema automatico per l'analisi e la visualizzazione del tremore vulcanico VoTA (Volcanic Tremor Analyzer).

In particolare, sono stati presi in considerazione cinque episodi eruttivi significativi dell'attività dell'Etna durante i quali il VoTA ha effettuato un'analisi on line del tremore vulcanico.

Successivamente, tali dati sono stati confrontati con le immagini dell'attività eruttiva riprese dalla telecamera di sorveglianza dell'Etna, permettendo di ricavare delle correlazioni tra le diverse fasi dell'attività esplosiva ed i corrispondenti valori del tremore vulcanico.

Introduzione

L'analisi del tremore generato dall'attività vulcanica è un metodo largamente utilizzato dai vulcanologi per determinare lo stato di un vulcano e per seguire lo sviluppo di una fase eruttiva [Endo et al., 1991]. L'ampiezza media del tremore era stata utilizzata da Sassa [1936] per descrivere lo stato del vulcano Aso in Giappone. Successivamente, Schich et al. [1982] e Schich [1988] si sono avvalsi di tale tecnica per documentare la cronistoria dell'attività sismica associata alle eruzioni

vulcaniche. Questi studi circostanziano la relazione esistente tra l'attività eruttiva ed il tremore vulcanico da essa generato. Per poter utilizzare il tremore vulcanico come tracciante delle diverse fasi osservate durante un evento eruttivo dobbiamo conoscere il suo andamento in tempo reale. Solitamente i segnali sismici vengono registrati in continuo su carta. Questo tipo di registrazione non consente di avere una visione complessiva dell'andamento del segnale per intervalli temporali abbastanza lunghi perché la carta deve essere cambiata con frequenza di alcune ore. Inoltre, la risoluzione grafica del segnale è scadente ed il lavoro manuale di misura dell'ampiezza dalla traccia è alquanto difficoltoso, a meno di fare forti approssimazioni.

Per ovviare a tale inconveniente è stato realizzato un semplice sistema per elaborare e visualizzare l'ampiezza del tremore e la sua evoluzione temporale mediante l'utilizzo del personal computer (PC). Il sistema proposto denominato VoTA (Volcanic Tremor Analyzer) è in grado di acquisire su PC i segnali sismici di alcune stazioni, disponibili in formato digitale; ripulirli da eventuali disturbi, quali ad esempio offset e segnali sismici ad alta frequenza prodotti da fenomeni di fratturazione delle rocce (terremoti); calcolare la media dei valori assoluti dell'ampiezza del segnale sismico in un intervallo temporale di poche decine di secondi; ed infine visualizzare sul monitor del computer l'andamento del segnale su periodi di tempo più o meno lunghi a scelta dell'operatore.

Questo sistema ha permesso di correlare in tempo quasi reale i valori di ampiezza del tremore alle immagini dell'attività eruttiva, riprese in continuo dalla telecamera di sorveglianza posta in prossimità dei crateri sommitali dell'Etna (Fig.1), al fine di classificare l'evento eruttivo in base alla sua tipologia e alla sua intensità.

Per validare la funzionalità di questo sistema sono stati analizzati i segnali sismici e le immagini registrate nei mesi di gennaio e

febbraio 1999 durante gli episodi eruttivi avvenuti nei giorni 16/01/1999, 18/01/1999, 20/01/1999, 23/01/1999 e 04/02/1999 al Cratere di Sud-Est dell'Etna.

VoTA (Hardware e Software)

Il sistema VoTA, per l'analisi automatica in tempo reale del tremore vulcanico, utilizza i segnali acquisiti da sei stazioni sismiche della rete dell'I.I.V. (Istituto Internazionale di Vulcanologia) dislocate come segue: tre in prossimità delle bocche eruttive dell'Etna [PDN, ECP e TDF] e tre poste a distanza di qualche chilometro dalle prime [CIS, ESP e CZM] (Fig.1).

Tali dati sono campionati a 100 Hz, convertiti in formato ASCII da un primo compu-

ter che funge da server ed ogni 75 secondi inviati ad un altro computer, il quale li elabora, li plotta su monitor e li salva su file in tempo reale mediante un soft-ware dedicato sviluppato in ambiente LabView della National Instruments.

Il programma (Fig.2) effettua ogni 25 secondi un primo controllo sulla data e l'ora di creazione dei file. Se il file in arrivo dal server è un file nuovo, allora il secondo pc inizia l'operazione di filtraggio ed elaborazione dei dati, altrimenti il programma rimane in attesa.

Innanzitutto viene calcolato il valore medio dei 7500 campioni (100 campioni al secondo per una finestra di 75 secondi). Dato che, durante l'intervallo di campionamento (1/100 di secondo), il segnale sismico relativo al tremore vulcanico non subisce variazioni impulsive, ma varia in maniera continua, ogni valore

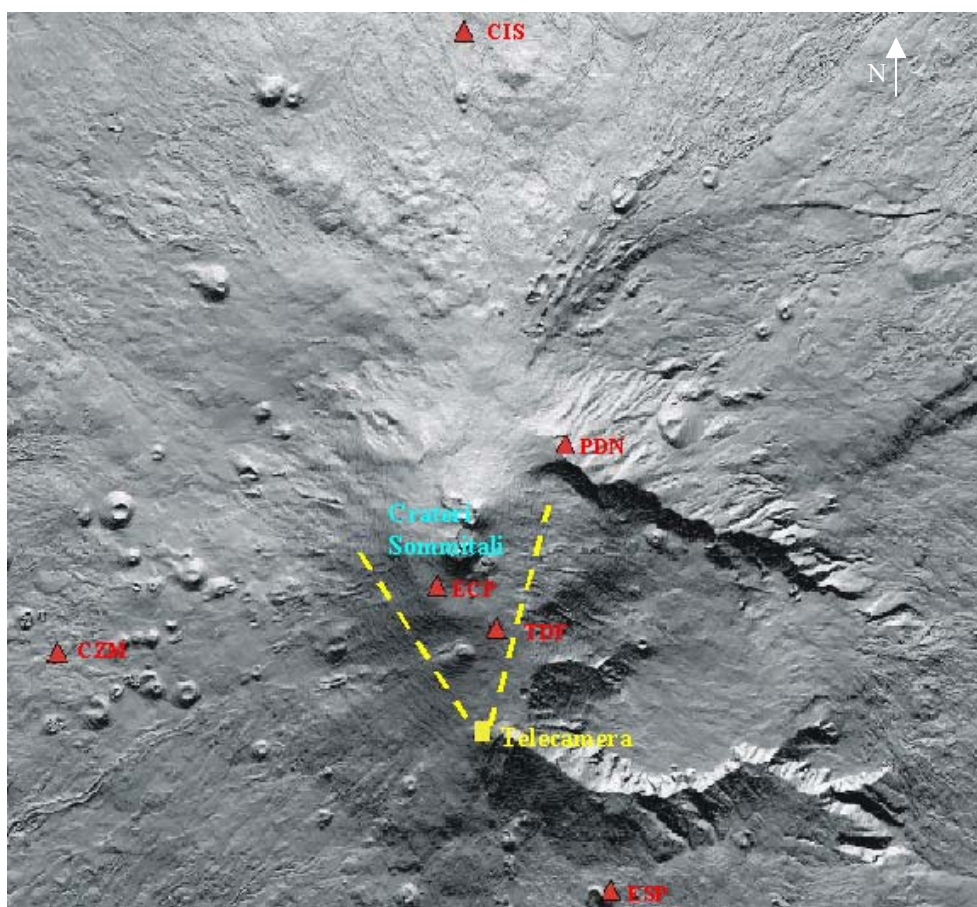


Fig. 1 Dislocazione delle sei stazioni sismiche di interesse e della telecamera posta in località La Montagnola.

viene confrontato con tale valore medio e se la differenza in valore assoluto è maggiore di un certo valore scelto sperimentalmente, allora il valore in questione è considerato disturbo e viene scartato, altrimenti viene utilizzato.

Tale procedura è stata implementata per eliminare in maniera definitiva gli spike ad alta frequenza che i filtri comuni non riuscivano ad eliminare del tutto.

Questi valori medi vengono plottati sul PC (Fig.3) assieme ai dati originali e quelli filtrati e salvati su un file che ha come identificativo il nome della stazione e la data.

Nei file archiviati ad ogni valore medio è associato l'orario di inizio del file ASCII elaborato contenente i 7500 campioni considerati.

Successivamente i dati salvati su file

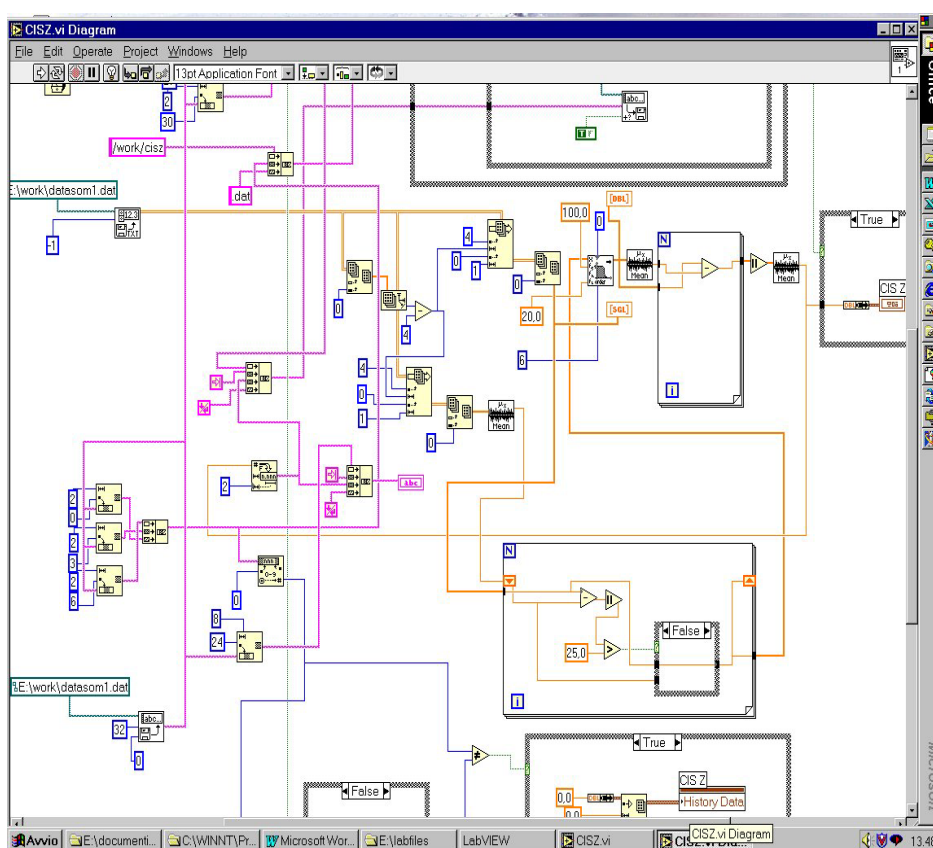


Fig. 2 Parte del software utilizzato per la realizzazione del VoTA.

I valori considerati entrano in un filtro passa basso di Butterworth del 6° ordine con frequenza di taglio superiore di 20 Hz. perché durante le esplosioni vulcaniche le frequenze di interesse vanno da 0.5 Hz a 10 Hz.

Al segnale così ripulito viene tolto l'offset dovuto alle stazioni ricalcolando la media e togliendo da ogni valore il valore medio.

Alla fine del procedimento viene calcolato, per ogni 75 secondi di dati, il valor medio dei 7500 valori assoluti.

possono essere riletti e visualizzati off-line (Fig.4).

In tal modo si possono analizzare i dati relativi allo stesso giorno acquisiti ed elaborati dalle sei stazioni ed i dati di sei giorni diversi acquisiti ed elaborati da un'unica stazione, selezionando nel programma sia la stazione che la data per ogni finestra ed avendo a disposizione fino a sei finestre per ogni videata.

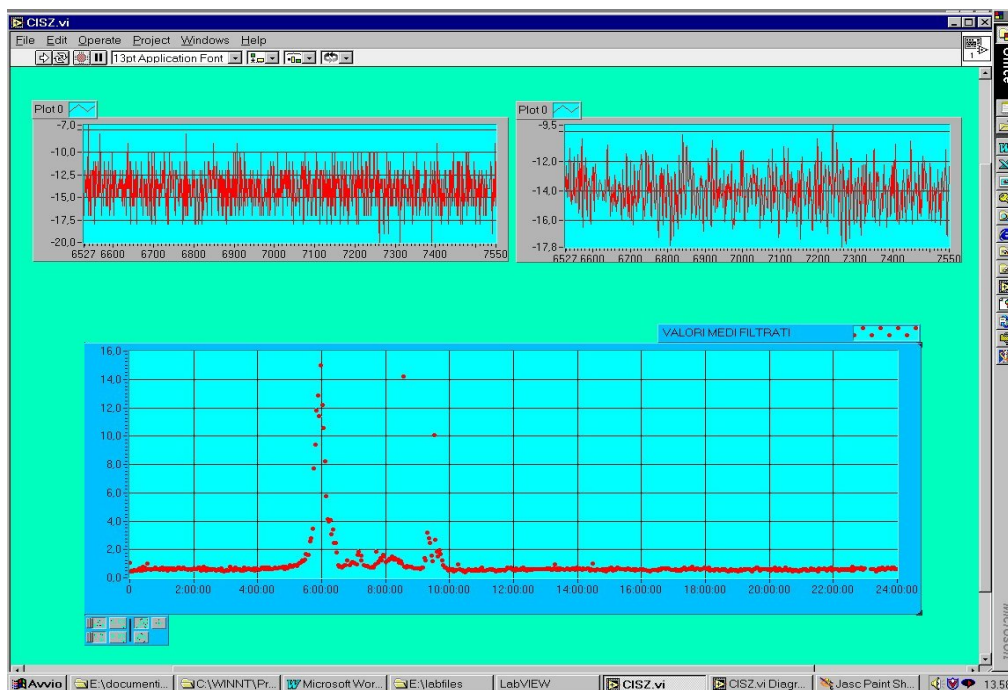


Fig. 3 Videata del programma in Labview che compare sul monitor.

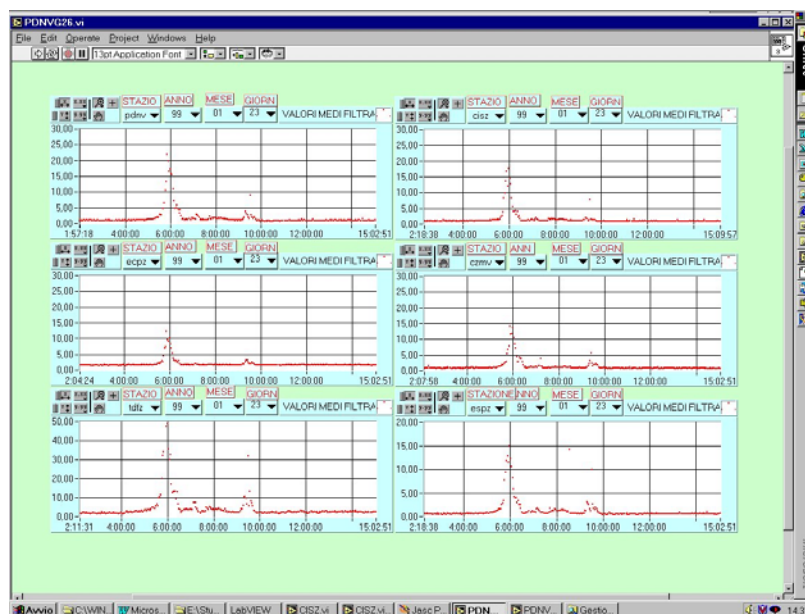


Fig.4 Videata del programma in Labview per le sei stazioni.

I dati processati dal VoTA sono stati infine correlati all'attività eruttiva dell'Etna utilizzando le immagini provenienti dalla telecamera di sorveglianza che filma in continuo l'attività del vulcano (Fig.5 e Fig. 6) posta in prossimità delle bocche eruttive e precisamente a La Montagnola.

La telecamera utilizzata a tale scopo, una Sony DXC 3000 IRP, può essere comandata via remoto utilizzando un opportuno software, dalla sede dell'I.I.V. di Catania, permettendo così, nel caso in cui l'attività ai crateri sommitali lo richieda, di zoomare, di cambiare inquadratura, di utilizzare appositi filtri e di azionare diversi attuatori tra i quali ad esempio una pompa per la pulizia del vetro dello shelter in cui è alloggiata la telecamera.



Fig.5 Shelter a La Montagnola.

Tali immagini arrivano in tempo reale alla sala operativa dell'Istituto Internazionale di Vulcanologia di Catania (Fig.7) dove vengono registrate mediante un videoregistratore Time-Lapse Panasonic alla frequenza di 2 frame/sec e visualizzate su monitor tv.

Durante gli eventi eruttivi più importanti il segnale video viene registrato anche alla velocità normale del sistema Pal (25 frame/sec) utilizzando un secondo videoregistratore professionale sempre della Panasonic, permettendo così una migliore osservazione dell'evento e della sua evoluzione temporale.

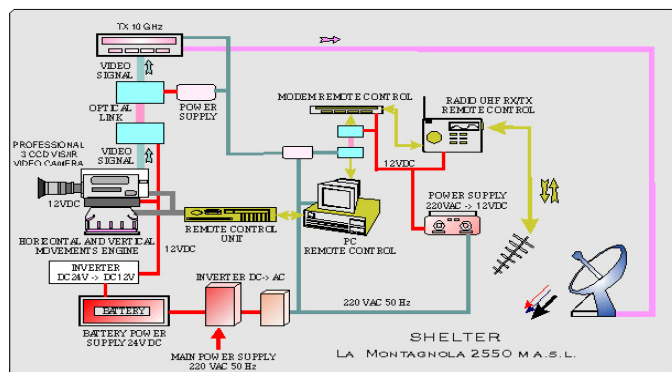


Fig.6 Schema della stazione video a La Montagnola.



Fig.7 Sala operativa dell'Istituto internazionale di Vulcanologia a Catania.

Analisi dei dati sismici del tremore vulcanico processati mediante il VoTA e delle immagini dell'attività esplosiva dell'Etna

In questo lavoro sono stati analizzati i dati del tremore vulcanico e le immagini dell'attività eruttiva dell'Etna nei giorni 16/01/1999, 18/01/1999, 20/01/1999, 23/01/1999, 04/02/1999.

In quei giorni è stato evidenziato un aumento considerevole del tremore in concomitanza dell'attività esplosiva che veniva osservata al Cratere di Sud-Est.

Le sei stazioni acquisite dal VoTA hanno fornito dei valori leggermente diversi tra loro a causa del fatto che sono dislocate a distanza diversa dalla bocca del Sud-Est.

I valori utilizzati per queste analisi sono quelli relativi alle stazioni TDF ed ESP, perché meglio dislocate rispetto al Cratere di Sud-Est. In particolare, la TDF è posta più vicino alla bocca del cratere rispetto alla ESP.

Attività del 16/01/1999

L'attività esplosiva del giorno 16/01/1999 è iniziata intorno alle ore 01.00 con delle esplosioni sporadiche intervallate da diversi minuti di inattività.

Nei grafici riportati (Fig. 8) sono rappresentati i valori del tremore vulcanico correlati dal sistema VoTA per le due stazioni di riferimento TDF ed ESP.

I grafici mostrano come i valori relativi a TDF sono nettamente superiori a quelli di ESP.

In una prima fase, durata circa 55 minuti (Fig. 8), i valori medi del tremore vulcanico sono stati pari al doppio dei valori relativi allo stato di inattività del vulcano. Durante le fasi di inattività dell'Etna i valori tipici del tremore forniti dal VoTA per la stazione di riferimento TDF sono pari a circa 2.0.

Intorno alle ore 01.55 sono iniziate ad intensificarsi le esplosioni, esse si susseguivano ad intervalli di uno o due secondi l'una dall'altra e la loro intensità era considerevolmente superiore rispetto a quella registrata nella fase precedente, infatti i valori erano in media sei volte maggiori.

Alle ore 02.25 le immagini della telecamera hanno mostrato l'inizio della fontana di lava ed i valori del tremore registrati sono stati decisamente superiori a quelli delle ore 01.55; ad esempio per la stazione TDF i valori oscillavano intorno a 43 e nei grafici (Fig. 8) si è notato un aumento repentino della pendenza della curva.

Dopo qualche minuto e precisamente alle ore 02.30 è iniziata la fase parossistica con la formazione della colonna eruttiva.

Il tremore ha raggiunto valori pari a 65 che hanno rappresentato la massima intensità registrata.

Alle ore 02.42, le immagini della telecamera hanno mostrato l'esaurirsi della fase parossistica e lo scemarsi dell'attività del vulcano. Anche i valori del tremore sono diminuiti e alla stazione TDF sono scesi a 45 evidenziando sul grafico (Fig. 8) l'inizio di un ripido gradiente negativo.

Dalle ore 02.42 alle ore 04.15 si sono verificate ancora esplosioni isolate. Il valore del tremore calcolato dal sistema è stato ancora leggermente superiore a quello relativo ai periodi di inattività ed il grafico (Fig. 8) ha evidenziato un decremento continuo della pendenza.

Successivamente, non sono state più registrate dalla telecamera immagini di attività esplosiva ed i valori del sistema, nel giro di pochi minuti, sono ritornati alla normalità cioè a quelli anteriori all'inizio dell'episodio eruttivo.

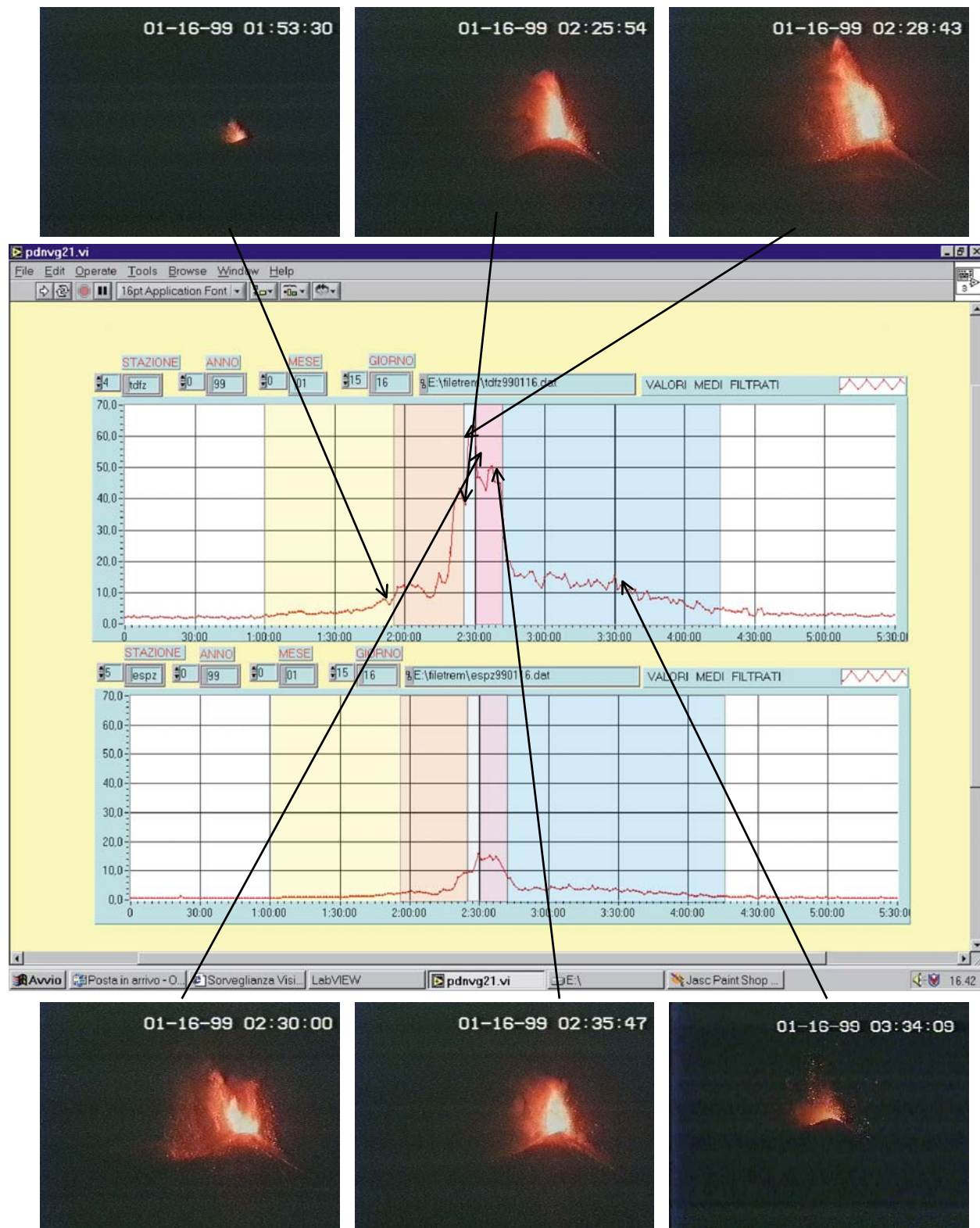


Fig.8 Grafici del programma VoTA del giorno 16/01/99 per le due stazioni TDF (sopra) e ESP (sotto) correlate alle immagini riprese della telecamera di sorveglianza.

Attività del 18/01/1999

L'attività esplosiva del giorno 18/01/1999 è iniziata intorno alle ore 06.20 con delle esplosioni sporadiche intervallate da diversi minuti di inattività.

Quarantadue minuti dopo le prime esplosioni, con valori del tremore calcolati dal sistema VoTA per la stazione di riferimento TDF pari a 4 (Fig.9), seguivano esplosioni ravvicinate con valori pari a 9 a distanza di uno-due secondi l'una dall'altra ed intensità considerevolmente superiore.

Alle ore 07.10 si è formata la fontana di lava. In tale fase i valori per la stazione di riferimento TDF sono saliti a 16 con un aumento repentino della pendenza (Fig.9).

Dopo qualche minuto e precisamente alle ore 07.14 è iniziata la fase parossistica con la formazione della colonna eruttiva.

Alla stazione TDF il valore del tremore era pari a 33 ed in un paio di minuti ha raggiunto il valore di 62 che rappresenta il massimo registrato.

Verso le ore 07.28, le immagini della telecamera hanno mostrato l'esaurirsi della fase parossistica e lo scemarsi dell'attività del vulcano. Anche i valori del tremore sono diminuiti e per la stazione TDF sono scesi a 30 evidenziando sul grafico (Fig.9) l'inizio di una ripida pendenza negativa.

Alle ore 07.38, si è avuto un breve incremento dell'attività con valori che sono risaliti a 42 per pochi minuti. Le ultime esplosioni significative si sono verificate alle ore 08.10 ed i valori, che erano scesi alle ore 07.50 a 6, sono nuovamente risaliti per tali esplosioni finali fino a 14. Da tale momento in poi il grafico (Fig. 9) ha evidenziato un decremento continuo della pendenza della curva.

Dalle ore 08.10 in poi non sono state osservate più immagini di attività esplosiva ed i valori del tremore sono ritornati alla normalità, cioè a quelli anteriori alle ore 06.20 nell'arco di 50 minuti.

Attività del 20/01/1999

L'attività esplosiva del giorno 20/01/1999 osservata dalla telecamera e registrata dal sistema automatico è stata di breve durata e di maggiore intensità rispetto alle precedenti.

Le prime esplosioni si sono manifestate alle ore 11.00 del mattino con valori del tremore alla stazione TDF pari a 3 (Fig.10).

Alle ore 11.40 si sono verificate esplosioni ravvicinate con valori del tremore pari a 12 ad uno o due secondi l'una dall'altra ed intensità considerevolmente superiore.

Alle ore 11.54 si è formata la fontana di lava. In tale fase i valori del tremore alla stazione di riferimento TDF sono saliti a 40 con un aumento repentino della pendenza della curva (Fig.10).

Dopo circa tre minuti e precisamente alle ore 11.57 è iniziata la fase parossistica con la formazione della colonna eruttiva.

Il tremore raggiungeva valori pari a 60 che in un paio di minuti salivano a quota 72 rappresentando il massimo valore del tremore registrato.

Verso le ore 12.08, le immagini della telecamera hanno mostrato l'esaurirsi della fase parossistica e lo scemarsi dell'attività del vulcano. Anche i valori del tremore sono diminuiti e per la stazione TDF sono scesi a 40 evidenziando sul grafico (Fig.10) l'inizio di una ripida pendenza negativa della curva.

Le ultime esplosioni significative con valori del tremore pari a 25 si sono verificate intorno alle ore 12.15. Da tale momento in poi il grafico (Fig. 10) ha evidenziato un decremento continuo della pendenza.

Successivamente la telecamera non ha mostrato più immagini dell'attività esplosiva ed i valori del sistema sono ritornati alla normalità, cioè a quelli anteriori alle ore 11.00 nell'arco di tre ore.

Tutta l'attività è durata all'incirca un'ora, ma con valori del tremore alti al culmine dell'attività esplosiva.

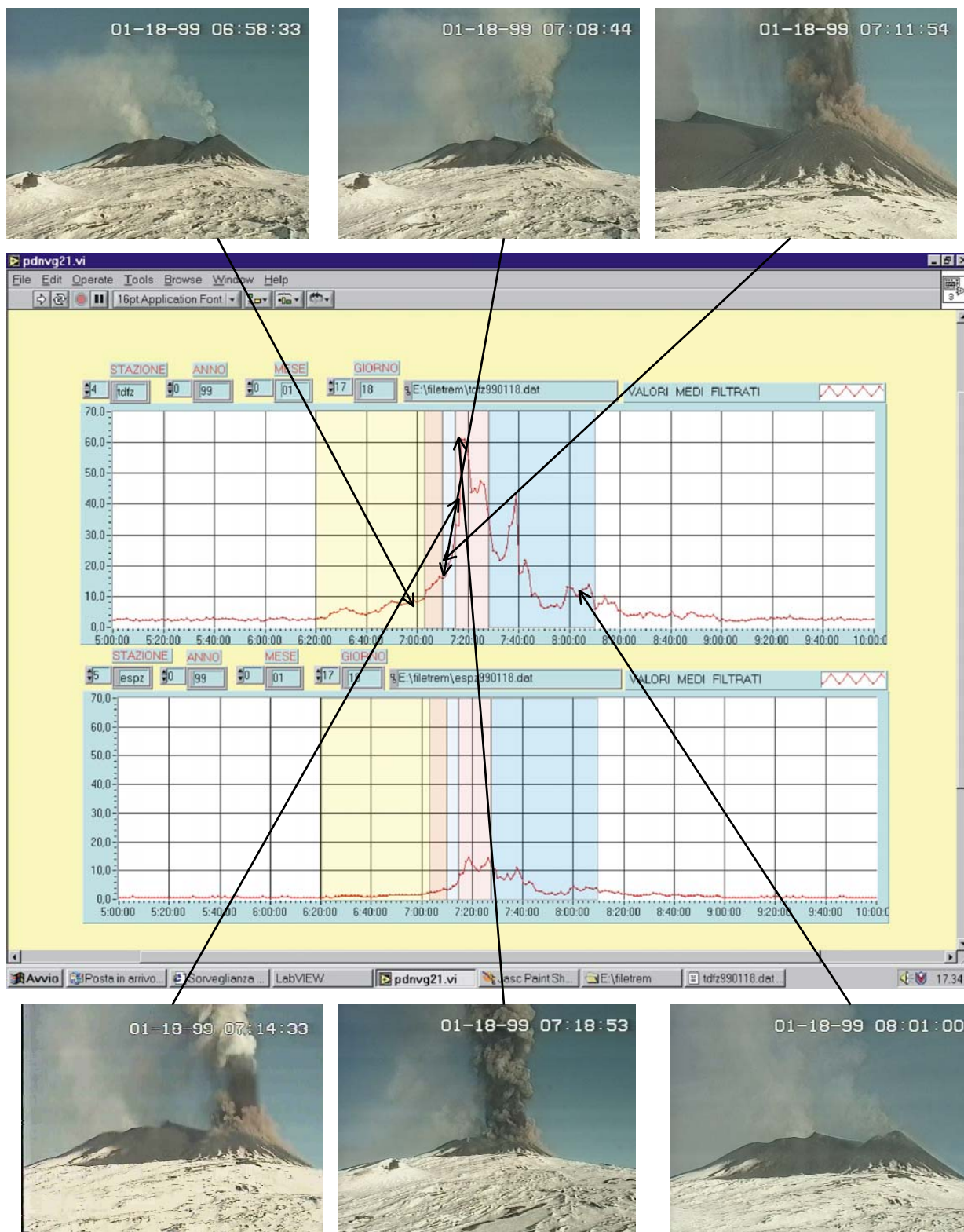


Fig.9 Grafici del programma VoTA del giorno 18/01/99 per le due stazioni TDF (sopra) e ESP (sotto) correlate alle immagini riprese della telecamera di sorveglianza.

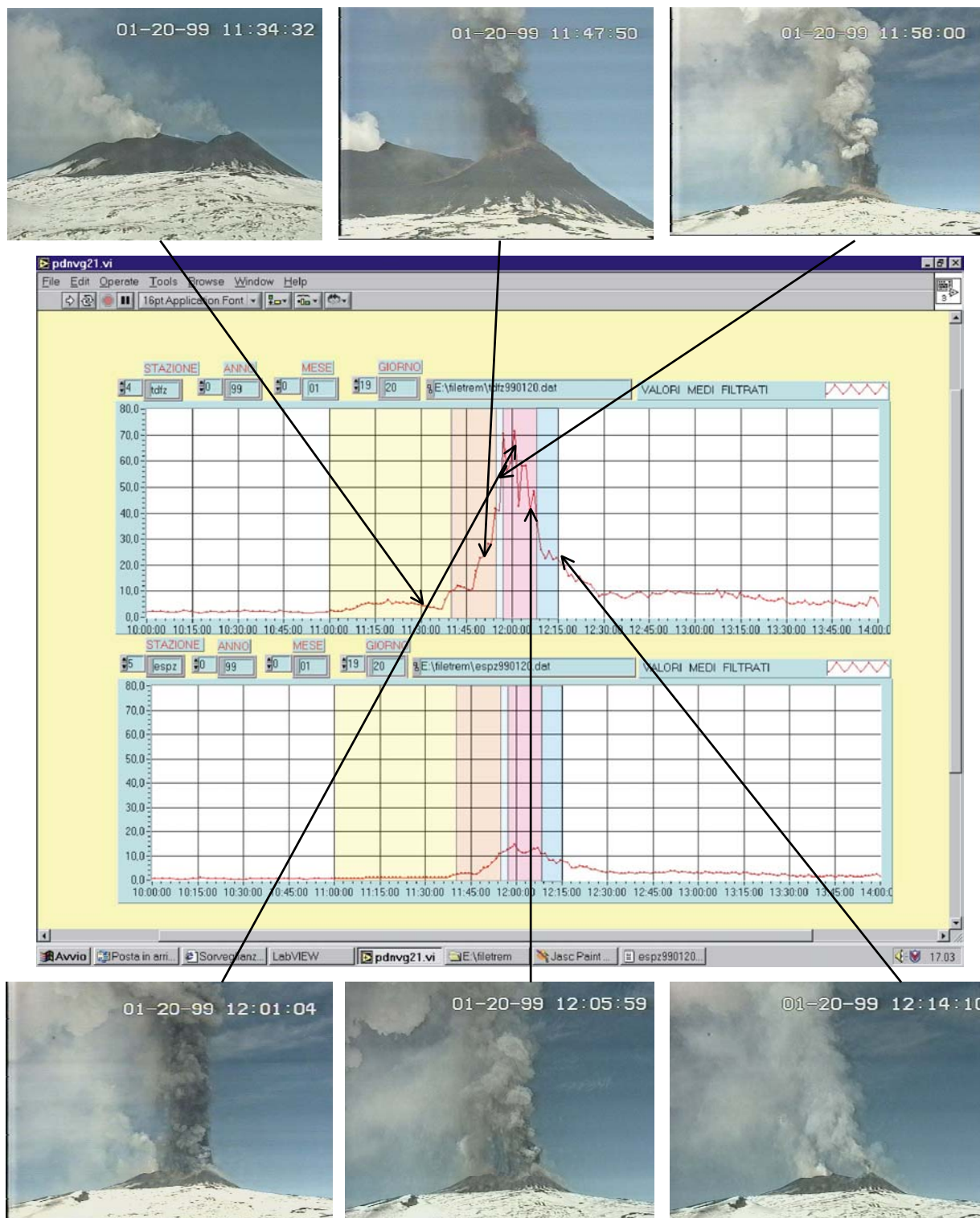


Fig.10 Grafici del programma VoTA del giorno 20/01/99 per le due stazioni TDF (sopra) e ESP (sotto) correlate alle immagini riprese della telecamera di sorveglianza.

Attività del 23/01/1999

Giorno 23/01/1999 le prime esplosioni osservate tramite la telecamera posta a La Montagnola si sono verificate intorno alle 04.00. Il sistema automatico ha fornito il valore 3 per la stazione TDF (Fig.11).

Alle prime esplosioni, hanno fatto seguito nel giro di 80 minuti esplosioni ravvicinate, uno o due secondi l'una dall'altra, con valori del tremore ancora non molto alti pari a 5.

Alle ore 05.45 è iniziata la fase sostenuta dell'episodio eruttivo con la fontana di lava ben visibile dalla telecamera (Fig.11); il valore del tremore è aumentato fino a 20.

Alle ore 05.50 con la formazione della colonna eruttiva il tremore ha raggiunto il valore 32. Durante tale fase si è avuto un repentino e considerevole aumento della pendenza della curva sul grafico plottato dal VoTA. Il massimo dell'attività si è registrato alle ore 05.52 con valori del tremore pari a 53.

La fine della fase parossistica è avvenuta alle ore 06.02 ed il valore fornito dal VoTA è stato di 35. Da questo momento è iniziata la fase decrescente dell'attività accompagnata da una rapida diminuzione dei valori del tremore rappresentata da una ripida pendenza negativa sul grafico (Fig.11).

Le ultime esplosioni visibili dalla telecamera si sono verificate alle ore 06.18 accompagnate da valori del tremore pari a 13. Intorno alle ore 09.20, dopo circa tre ore di apparente inattività, sono comparse esplosioni sporadiche fino alle 09.40. Durante questi 20 minuti i valori del tremore, che in precedenza erano scesi intorno a 5 sono risaliti gradualmente fino a raggiungere un picco pari a 33 alle ore 09.30.

Successivamente non sono state osservate immagini dell'attività esplosiva dalla telecamera ed i valori del sistema sono rapidamente ritornati alla normalità, cioè a quelli anteriori alle ore 04.00.

Attività del 04/02/1999

L'attività del 04/02/1999 ha presentato aspetti diversi rispetto a quelle precedenti a causa di una frattura apertasi alla base del Cratere di Sud-Est durante la fase parossistica.

Le prime esplosioni sono iniziate verso le ore 14.00. I valori del tremore calcolati col sistema automatico VoTA per la stazione TDF erano pari a 3.

Alle ore 15.00 le esplosioni si susseguivano ad uno-due secondi l'una dall'altra con valori del tremore pari a 8. Alle ore 15.30 è iniziata la fase sostenuta con valori uguali a 15. Dopo circa 7 minuti, dalle immagini provenienti dalla telecamera di sorveglianza (Fig.12) si è visto chiaramente il fenomeno della fratturazione del cono di Sud-Est. In quel momento il valore del tremore è salito a 18.

L'inizio della fase parossistica è avvenuto alle ore 15.37 subito dopo la fratturazione ed ha presentato valori del tremore pari a 38.

Durante tale periodo la pendenza sui grafici plottati dal VoTA è aumentata rapidamente.

Alle ore 15.52 è finita la fase parossistica ed il valore è sceso a 28.

Da tale momento in poi, il grafico (Fig.12) ha evidenziato una ripida pendenza negativa fino alle ultime esplosioni delle ore 16.13. A tale ora, il valore calcolato dal VoTA è stato pari a 15.

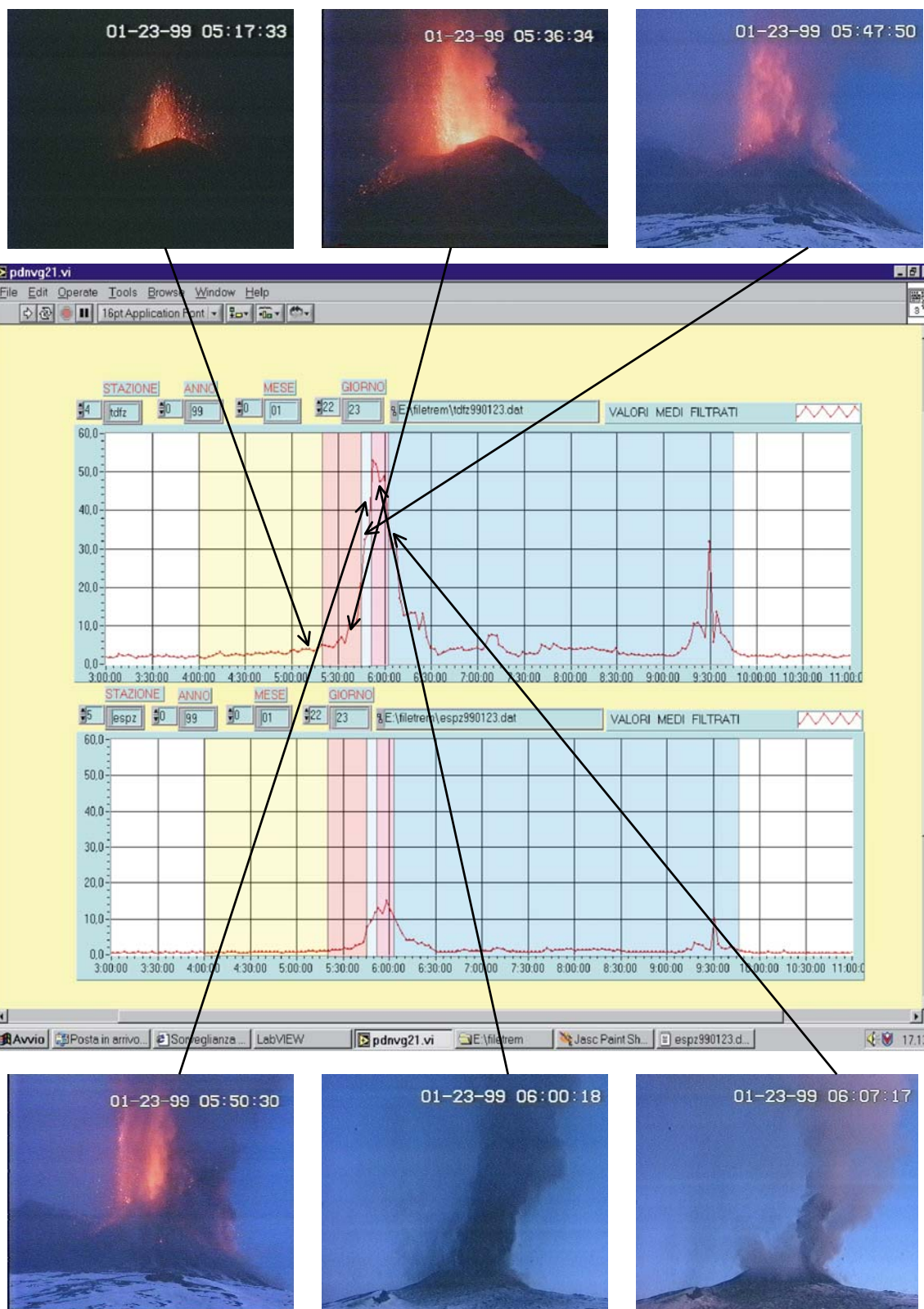


Fig.11 Grafici del programma VoTA del giorno 23/01/99 per le due stazioni TDF (sopra) e ESP (sotto) correlate alle immagini riprese della telecamera di sorveglianza.

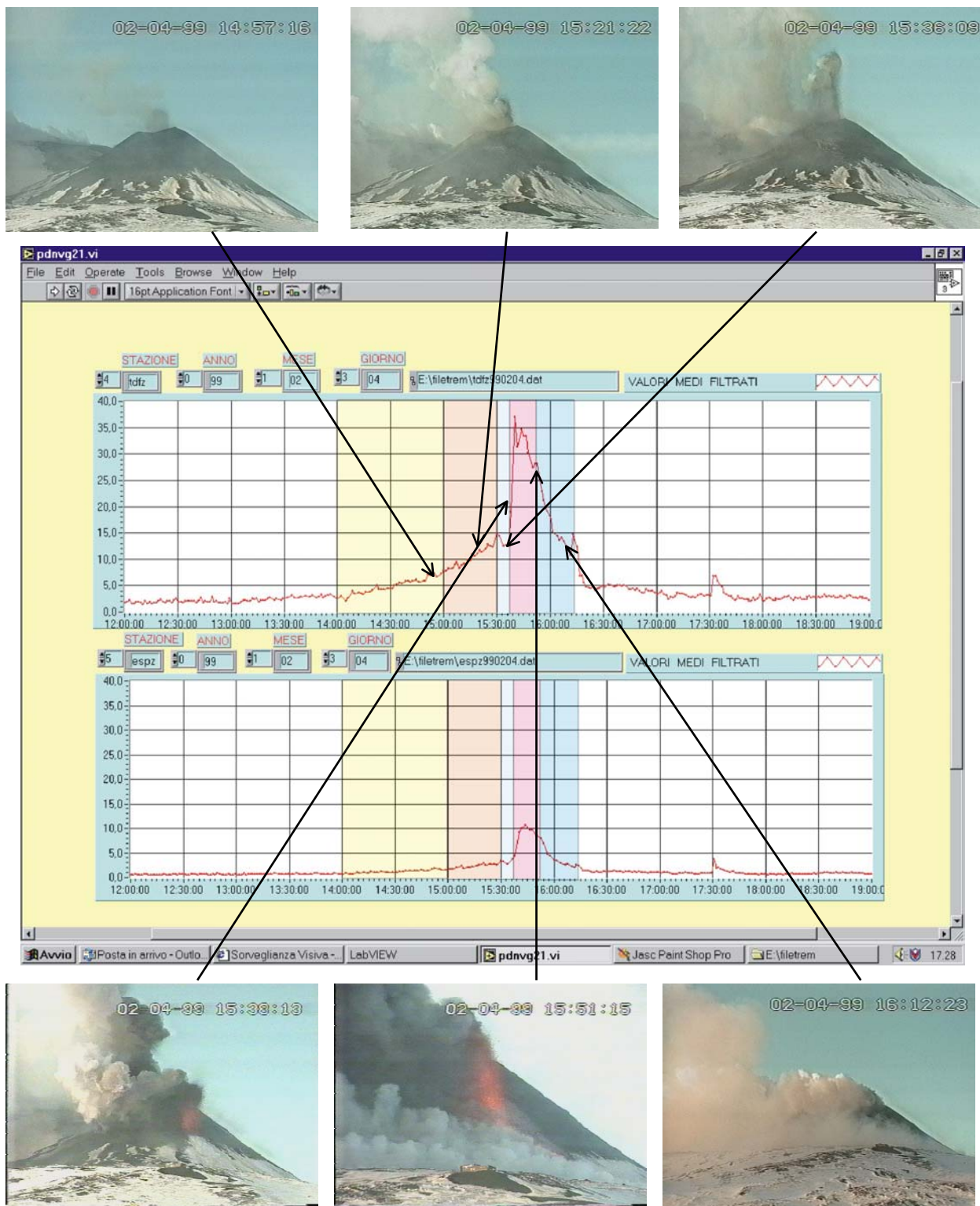


Fig.12 Grafici del programma VoTA del giorno 04/02/99 per le due stazioni TDF (sopra) e ESP (sotto) correlate alle immagini riprese della telecamera di sorveglianza.

Conclusioni e sviluppi futuri

Dall'analisi dei dati relativi al tremore vulcanico forniti dal sistema VoTA e dall'analisi delle immagini dell'attività esplosiva dell'Etna relative agli stessi giorni, si sono potute descrivere con estrema cura le diverse fasi che si manifestano e susseguono durante l'attività esplosiva di un vulcano.

Si è pensato quindi di suddividere ogni episodio eruttivo sopra descritto nelle seguenti sei fasi principali:

1. Attività Discontinua: l'intervallo di tempo fra due eventi esplosivi varia da alcuni secondi a qualche minuto ed i valori forniti dal VoTA sono leggermente superiori a quelli relativi ad uno stato di inattività del vulcano.
2. Attività Continua: si verifica un'esplosione ogni 1-2 secondi e l'aumento dei valori del tremore inizia a divenire significativo.
3. Fase Sostenuta: inizia la fontana di lava, ovvero l'emissione continua di materiale dalla bocca del cratere e la pendenza dei valori forniti dal VoTA, osservabile dai grafici, sale rapidamente.
4. Inizio della Fase Parossistica: inizia a formarsi la colonna eruttiva di cenere, continua la fontana di lava ed i valori del VoTA raggiungono il massimo.
5. Fine della Fase Parossistica: si esaurisce la colonna eruttiva di cenere, termina la fontana di lava ed inizia il decremento, quasi sempre rapido, dei valori del tremore.
6. Esplosioni Finali: sono presenti le ultime esplosioni di un certo interesse prima che l'attività abbia termine del tutto ed i valori forniti dal VoTA ritornano lentamente a quelli relativi ad uno stato di inattività del vulcano.

Tutto ciò ha evidenziato una stretta correlazione tra i dati relativi al tremore vulcanico forniti dal sistema VoTA e le immagini dell'attività esplosiva dell'Etna.

Il sistema VoTA è stato inoltre di notevole aiuto per lo studio dell'attività esplosiva dei vulcani attivi, permettendo di analizzare e visualizzare una mole notevole di dati in tempo reale su personal computer.

Con tale sistema diviene abbastanza semplice individuare se esistono ciclicità nell'attività di un vulcano, avendo la possibilità di analizzare facilmente l'andamento del tremore per intervalli temporali molto lunghi.

È anche possibile, inserendo degli allarmi e scegliendo opportunamente delle soglie, attivare in modo automatico degli stati di allerta poco prima o subito dopo l'inizio dell'attività esplosiva di un vulcano.

Su tali dati, salvati su file, è possibile anche effettuare studi statistici più complessi per poter calcolare quella piccola parte dell'energia liberata durante le esplosioni dovuta all'attività sismica.

Bibliografia

- Endo E T, Murray T (1991). *Real-time Seismic Amplitude Measurement (RSAM): a volcano monitoring and prediction tool*. Bull Vulcanol (1991) 53:533-545
- Sassa K. (1936). *Micro-Seismometric study on eruption of the Volcano Aso (Part II of the Geophysical studies on the Volcano Aso)*. Memoirs of the College of Science, Kyoto Imperial University, vol XIX, 1:11-56
- Schick R., Lombardo G., Patanè G. (1982). *Volcanic tremors and shocks associated with eruptions at Etna (Sicily), September 1980*. J Volcanol Geotherm Res 14:261-79
- Schick R. (1988). *Volcanic tremor-source mechanisms and correlation with eruptive activity*. Natural Hazards 1:125-144